

要旨

高精度の加工を可能にするためには、加工の状態を事前に予測し最適な加工条件を設定することが重要となる。そこで、本報告では、工作機械機構モデルにおける誤差要素として切削力による工作機械の弾性変形を考慮し、切削抵抗の算出を行って加工誤差の予測を行う手法について述べる。また、3軸立てフライスによるエンドミル側面切削加工の場合について実験と予測による加工誤差の比較を行って有効性を確認している。

1. 緒論

切削加工において工作機械は、工具と工作物との相対位置を決めて要求形状を創成する。その際、工作機械の組み立て誤差や熱変形、弾性変形、振動などの様々な要因が、加工誤差に大きな影響を与える。その中でも弾性変形は、切り込みや送り速度、工具の回転数などにより複雑に変化し、比較的大きな影響を与えている。このような加工誤差をオフラインであらかじめ解析することができれば、生成された工具経路の評価や修正など加工条件の最適化の支援を行うことが可能となる。

そこで、本報告では、Portmanら¹⁾が提案した幾何学的誤差を含む工作機械機構モデルを用い、エンドミル側面切削加工による切削抵抗を解析し、その切削抵抗による工作機械の弾性変形を誤差要因とし、加工誤差の予測を行う。また、3軸立てフライス盤のエンドミル側面加工を例とし、本手法の有効性を確認する。

2. 加工誤差予測

2.1 工作機械機構モデル

切削加工によって得られる加工面は、工作機械の各要素の移動に伴う工具と工作物との相対位置の変化によって生成されるため、その形状は切削点を工作物の座標系での位置ベクトルで表現することによって得られる。この工具と工作物の相対位置を決定するのは工作機械の移動要素であり、各移動要素を表現するマトリクスは、同次座標系での6種類の座標変換マトリクスで表現される。これらの座標変換マトリクスは、 x, y, z 方向の並進を表す変換マトリクスにそれぞれ $k = 1, 2, 3$ 、 x, y, z 軸回りの回転に $k = 4, 5, 6$ と番号を付け、移動量を示す変数 q を用いて、 $A^k(q)$ と表す。これにより、工作機械のレイアウトは工作物側から各要素に設定されたマトリクスの番号によって表現され、工作物の座標系での加工点の位置ベクトルは、これらのマトリクスの積で表現される。

工作機械の i 番目の移動要素で発生した誤差を表現するマトリクス δA_i は、並進変位を表すマトリクス δ_t と角変位を表すマトリクス δ_r の和によって表現することができ、以下のようなになる。

$$\delta A = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma & \beta & \delta_x \\ \gamma & 0 & -\alpha & \delta_y \\ -\beta & \alpha & 0 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

この誤差のマトリクスを用いて、工作物上に固定された座標系での誤差ベクトル Δr_0 は、以下のように表わせる。ただし、 r_i は工具の座標系での切削点の位置ベクトル。

$$\Delta r_0 = \sum_{i=0}^l A_{0,i} \delta A_i A_i^{-1} r_i \quad (2)$$

2.2 弾性変形による誤差

本報告では、工作機械の各要素を剛体と考え、要素間に存在する弾性要素による変位により誤差マトリクスを作成している。弾性変位の算出は、各軸に対して並進方向と回転方向を考慮した弾性マトリクスを作成し、その要素に作用する力を求め、計算している。

2.3 切削抵抗の予測

エンドミルの側面加工において、切削抵抗は切削面積に比例することが知られており、この比例定数は比切削抵抗と呼ばれている。したがって、切り込み、送り、主軸の回転数、工具の刃数などから切削面積を算出し、比切削抵抗を掛けることにより切削抵抗を求めることができ、切れ刃1枚が工作物と接触しているあいだの最大値を切削抵抗(配分力)として用いている。

2.4 解析手順

解析手順は、以下のようなになる。

- 工作機械の剛性を測定し、剛性マトリクスを作成する、
- 工具と工作物の形状より切削面積を求め、切削抵抗を算出する、
- 各要素に作用する荷重を求め、弾性変位を求める、
- 弾性変位より誤差マトリクスを作成する、
- 工作物の座標系での切削点の誤差を求める、

3. 解析例

3.1 工作機械の解析モデル

解析例として、3軸立てフライス盤の解析を行う。解析対象とする工作機械である3軸立てフライス盤のレイアウトは、図1で示すように $K = 13026$ であり、各部の移動要素の位置を決めるための座標変換を加えると以下のようになる。

$$r_0 = A_1^1 A_2^3 A_3^2 A_4^3 A_5^2 A_6^2 A_7^3 A_8^6 r_1 \quad (3)$$

3.2 工作機械の弾性の測定

誤差マトリクスは、xテーブルの移動、y方向の工具の移動、主軸の回転の3箇所に対してそれぞれ、 $\delta A_1, \delta A_5, \delta A_8$ とする。これらのマトリクスは、各テーブルについては移動方向、主軸については曲げ方向を考慮した剛性マトリクスを用いている、これらの剛性は実験より求めた。図2で示すように、x方向のテーブル上に動力計をつけ移動によって生じる変位と荷重の測定によって剛性を求めている。主軸部分の曲げ剛性は、チャックの回転軸方向に2点測定し、この2点より傾きを求め荷重との関係より求めている。また、x、y方向の剛性は、NCの示す移動量と接触点の変位の差によって推定した。

4. 解析結果

図4に加工誤差予測をおこなった結果と同じ条件での切削実験での加工誤差の結果を示した、ともに、工具軸方向の最大誤差である。加工形状は半径300mmの一部を、 $\phi 20$ のエンドミルによって切削を行った結果である。(図3参照) また、工具は、はり要素としてモデル化し、解析に加えている。

予測結果は、実際の加工誤差と比較して最大で 100μ 程度の誤差はあるものの傾向が一致している。また、切削の切り始めの側で加工誤差が大きくなる傾向にあるが、これは切り込み方向が工具の移動に対して垂直な方向になるため、切り込み深さが大きくなり切削抵抗も大きくなっていることによるものと考えられる。

5. 結論

- 工作機械機構モデルを用いて工作機械の弾性変形を考慮した加工誤差予測の手順を示した。
- 3軸立てフライス盤によるエンドミル側面切削の加工誤差予測と実験を行い、その有効性を確認した。

本報告では、最大誤差の解析を行っているがエンドミルの詳しいモデルを用いることにより、工具軸方向の誤差分布を解析することも可能である。

参考文献

- 1) D.N. Reshetov and V.T. Portman : "Accuracy of Machine Tools, ASME Press(1985)"
- 2) 春本玲子, 稲崎一郎 : "形状創成関数理論による工作機械の誤差解析", 精密工学会誌 59,6(1993)
- 3) 大木 雅 他 : "エンドミル切削加工における加工誤差の先行予測に関する研究(第2報)" 1993年北海道支部学術講演会論文集

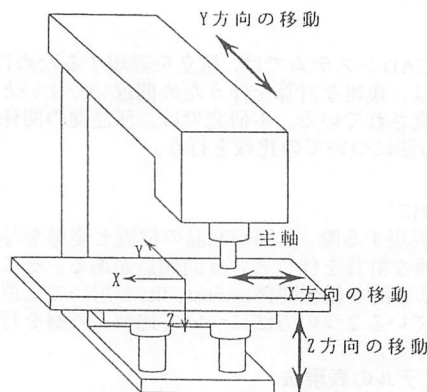


図1 解析対象とする工作機械レイアウト

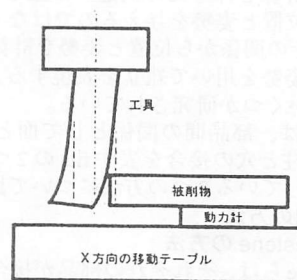


図2 工作機械の剛性の測定

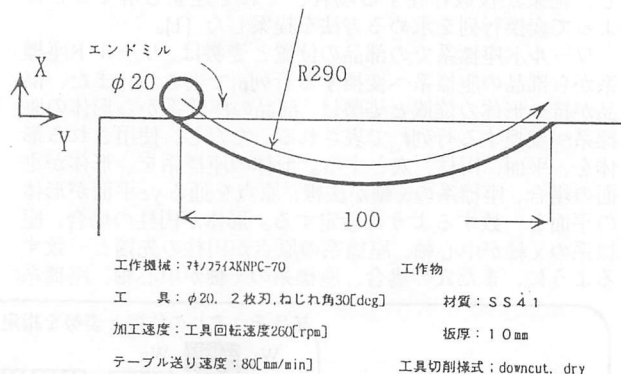


図3 要求形状と諸条件

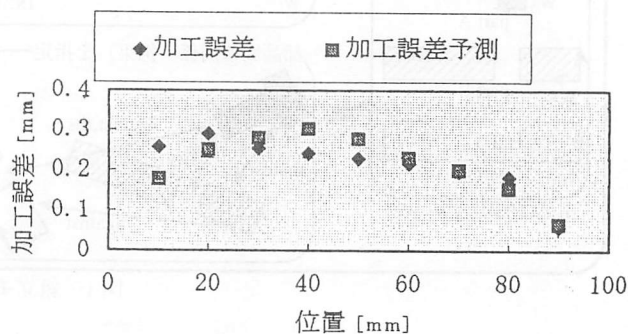


図4 解析結果